

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 536.632, 502.132

DOI 10.55421/3034-4689\_2025\_28\_12\_30

А. У. Аетов, К. В. Саерова, В. В. Бронская,  
Л. Л. Закирова, А. А. Маннанова

### КИНЕТИКА РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ ПЕРОКСИДОМ ВОДОРОДА В ВОДНОЙ СРЕДЕ В СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДНЫХ УСЛОВИЯХ

**Ключевые слова:** вода, олеиновая кислота, пероксид водорода, эмульсия, двойные и тройные смеси, СКВО, константа скорости.

В данном исследовании представлен комплексный экспериментальный и теоретический анализ процесса сверхкритического водного окисления (СКВО) олеиновой кислоты, используемой в качестве модельного соединения для изучения деструкции жирных кислот в отходах химических производств. Метод СКВО признается одной из наиболее перспективных экологически безопасных технологий для глубокой переработки органических отходов, основанной на уникальных физико-химических свойствах воды в сверхкритическом состоянии. В работе изучены кинетические аспекты процесса окисления пероксидом водорода в температурном диапазоне 673-723 К при постоянном давлении 29,4 МПа. Для преодоления проблемы ограниченной взаимной растворимости реагентов при комнатной температуре была разработана и оптимизирована методика приготовления стабильной эмульсии с применением ультразвукового диспергирования на оборудовании Hielscher UIP1000HD. Мониторинг эффективности процесса проводился через изменение показателя химического потребления кислорода (ХПК), а качественный и количественный состав продуктов реакции анализировался с использованием комплекса современных аналитических методов, включая газовую хроматографию-масс-спектрометрию и ИК-Фурье спектроскопию. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность окисления олеиновой кислоты в сверхкритических условиях с достижением степени конверсии 88,6% при оптимальных параметрах процесса. Кинетический анализ установил, что реакция имеет первый порядок, а основным идентифицированным продуктом окисления является уксусная кислота. Рассчитанные кинетические параметры процесса включают энергию активации - 94,82 кДж/моль и предэкспоненциальный множитель 25908 с<sup>-1</sup>. Теоретически на основе анализа диэлектрических характеристик системы определен оптимальный температурный диапазон 750-800 К для обеспечения максимальной взаимной растворимости реагентов. Полученные научные данные вносят существенный вклад в понимание механизма СКВО карбоновых кислот и предоставляют фундаментальную основу для проектирования и оптимизации промышленных установок переработки органических отходов.

А. У. Аетов, К. В. Саерова, В. В. Бронская,  
Л. Л. Закирова, А. А. Маннанова

### KINETICS OF THE OXIDATION REACTION OF OLEIC ACID BY HYDROGEN PEROXIDE IN AN AQUEOUS MEDIUM UNDER SUPERCRITICAL FLUID CONDITIONS

**Keywords:** water, oleic acid, hydrogen peroxide, emulsion, binary and ternary mixtures, SCVO, rate constant.

This study presents a comprehensive experimental and theoretical analysis of the supercritical water oxidation (SCWO) of oleic acid used as a model compound to study the degradation of fatty acids in chemical waste. The SCWO method is recognized as one of the most promising environmentally friendly technologies for deep processing of organic waste based on the unique physicochemical properties of supercritical water. The kinetic aspects of the oxidation process with hydrogen peroxide in the temperature range of 673-723 K at a constant pressure of 29.4 MPa are studied. To overcome the problem of limited mutual solubility of reagents at room temperature, a technique for preparing a stable emulsion using ultrasonic dispersion on Hielscher UIP1000HD equipment was developed and optimized. The process efficiency was monitored through the change of the chemical oxygen demand (COD) index, and the qualitative and quantitative composition of the reaction products was analyzed using a set of modern analytical methods, including gas chromatography-mass spectrometry and FTIR spectroscopy. The obtained results demonstrate high efficiency of oleic acid oxidation under supercritical conditions with the conversion degree of 88.6% achieved at optimal process parameters. Kinetic analysis established that the reaction is first order, and the main identified oxidation product is acetic acid. The calculated kinetic parameters of the process include the activation energy of -94.82 kJ/mol and the pre-exponential factor of 25908 s<sup>-1</sup>. The optimal temperature range of 750-800 K was determined theoretically based on the analysis of the dielectric characteristics of the system to ensure maximum mutual solubility of the reagents. The obtained scientific data make a significant contribution to the understanding of the SCWO mechanism of carboxylic acids and provide a fundamental basis for the design and optimization of industrial plants for the processing of organic waste.

#### Введение

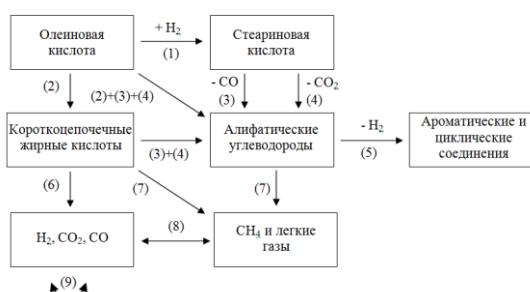
Метод сверхкритического водного окисления (СКВО) признается одним из наиболее экологически безопасных подходов к утилизации отходов промышленного и бытового происхождения [1-6]. В

состоянии сверхкритического флюида вода демонстрирует свойства высокоэффективного растворителя, что способствует значительной интенсификации тепломассообмена и увеличению скоростей протекания химических превращений [7-9].

9]. Окислительная деструкция органических веществ в данных условиях приводит к их полному разложению с образованием диоксида углерода и воды, тогда как азотсодержащие соединения преобразуются в молекулярный азот и оксиды азота.

Несмотря на устойчивый интерес научного сообщества к реакциям в сверхкритических флюидных средах, многие фундаментальные аспекты данного метода остаются недостаточно исследованными. Наиболее значительные проблемы в современных знаниях касаются термодинамики многокомпонентных реакционных систем, кинетических закономерностей и сопутствующих тепловых явлений. Между тем, именно эти параметры имеют определяющее значение для создания адекватных математических моделей, инженерного проектирования и последующей оптимизации технологических процессов, основанных на использовании сверхкритической воды. Большинство отходов химических производств представляют собой водные растворы органических и неорганических соединений, содержащие ценные компоненты, которые претерпевают различные превращения в результате переработки, очистки и утилизации.

Для исследований выбрана реакция окисления пероксидом водорода в сверхкритической водной среде олеиновой кислоты. Выбор этой модельной системы обусловлен наличием некоторых данных по кинетическим характеристикам этой реакции, проведенных при различных параметрах состояния с различными окислителями [10-12]. Вместе с тем, отсутствуют сведения по термодинамическим свойствам, особенно, в окколокритической области состояния. На рис. 1. приведена одна из схем реакционных направлений разложения олеиновой кислоты в сверхкритической воде [11].



**Рис. 1 – Реакционные направления разложения олеиновой кислоты в сверхкритической воде по данным [11]: 1 – Гидрирование; 2 – Расщепление связи С-С; 3 – Декарбонилирование; 4 – Декарбоксилирование; 5 – Ароматизация и циклизация; 6 – Газификация; 7 – Крекинг; 8 – Метанирование; 9 – Водно-газовый сдвиг (перемещения)**

**Fig. 1 – Reaction pathways for the decomposition of oleic acid in supercritical water according to [11]: 1 – Hydrogenation; 2 - C-C bond cleavage; 3 - Decarbonylation; 4 - Decarboxylation; 5 - Aromatization and cyclization; 6 - Gasification; 7 - Cracking; 8 - Methanation; 9 - Water-gas shift (displacement)**

Реакционные направления разложения олеиновой кислоты пероксидом водорода при разных условиях, рассмотренные [12], подтверждают формирование водородных ассоциатов, наличие которых приводит к межмолекулярному дегидратированию и образованию чрезвычайно нестабильных алкилзамещённых карбоксил-радикалов, которые разлагаются на диоксид углерода и алкил-радикалы либо воду.

## Экспериментальная часть

Исследование кинетики реакции окисления водной эмульсии олеиновой кислоты перекисью водорода в СКФ условиях проведена на установке периодического действия [13] при мольных соотношениях вода – олеиновая кислота–пероксид водорода = 0,96:0,008:0,032 в интервале температур 673–723 К и давлении 29,4 МПа.

В работе использованы следующие реагенты:

- олеиновая кислота марки «ХЧ» ( $n_D^{20} = 1,4602$ ,  $\rho_4^{25} = 910,1 \text{ кг}/\text{м}^3$ );
- водный раствор перекиси водорода ГОСТ 177-88 (ОКП 21 2352 0100) с массовой доли перекиси 36,43 % ( $n_D^{20} = 1,3563$ ,  $\rho_4^{25} = 1136 \text{ кг}/\text{м}$ );
- вода (бидистиллят:  $n_D^{20} = 1,3329$ ,  $\rho_4^{25} = 997,1 \text{ кг}/\text{м}$ ).

Олеиновая кислота при комнатной температуре не смешивается с водой и не растворяется в ней. С целью создания гомогенной смеси (эмulsionи) осуществлена ультразвуковая обработка двухфазной смеси. Для получения стабильной эмульсии применялось оборудование ультразвукового диспергирования «UIP1000HD» (Hielscher, Германия), при этом процесс ультразвуковой обработки двухфазной системы реагентов обеспечил увеличение межфазной поверхности контакта, что способствовало интенсификации кинетики химического превращения [14]. Методика приготовления эмульсии включала следующие стадии: дистиллированную воду и олеиновую кислоту в указанных соотношениях помещали в рабочую кювету эмульгатора и обрабатывали ультразвуком с частотой 21 кГц в течение 10 минут, далее полученная эмульсия подвергалась последующему анализу для определения химического потребления кислорода (ХПК).

Определение ХПК исследуемых образцов в данной работе проведено экспресс методом с помощью автоматического титратора T70 фирмы «Mettler Toledo» с использованием комбинированного платинового электрода DMi140-SC с пористой диафрагмой из керамики. Принцип действия титратора основан на непрерывном измерении сигнала, поступающего с первичного преобразователя, помещенного в анализируемый раствор при добавлении титранта до достижения точки эквивалентности или конечной точки. При измерении значения химического потребления кислорода, применяется фотометрическое титрование – изменение оптических свойств анализируемого раствора – оптической плотности, которое измеряется фототродом. До проведения

экспериментальных опытов, для определения нужного количества водного раствора перекиси водорода, определялось значение ХПК олеиновой кислоты (табл. 1).

Анализ продуктов реакции на содержание олеиновой кислоты выполнялся методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием на системе «DFS Thermo Electron Corporation» (Германия). Разделение компонентов проводилось на капиллярной колонке ID-BP5X производства SGE (Scientific Glass Engineering, Австралия) длиной 50 м и внутренним диаметром 0,32 мм со стационарной фазой, содержащей 5 % дифенила и 95 % диметилполисилоксана, при толщине слоя 0,32 мкм. В качестве газа-носителя использовался гелий. Обработка масс-спектров проводилась с применением программного обеспечения «Xcalibur». Перед анализом пробы объемом 0,1 мкл предварительно растворялись в этаноле в соотношении 1:1. Температурный режим хроматографирования включал следующие стадии: начальная температура 393 К с выдержкой 1 минуту, нагрев со скоростью 20 К/мин до 553 К и финальную изотермическую выдержку в течение 20 минут.

Приготовленная эмульсия заливается в реактор объемом 40 мл. В соответствующей пропорции добавляется пероксид водорода ( $H_2O_2$ ). После достижения режимных параметров осуществления реакции отсчитывается ее длительность (10, 20 и 30 минут), далее производится отбор проб и охлажденные образцы анализируются на показания ХПК.

Эффективность процесса окисления определяется по формуле [15]:

$$X = 1 - \frac{ХПК_{кон}}{ХПК_{нач}}, \quad (1)$$

где  $ХПК_{кон}$  и  $ХПК_{нач}$  – показатели химического потребления кислорода после и до реакции окисления в водной среде в СКФ условиях,  $mgO_2/l$ .

Избыток используемого кислорода рассчитывается по следующему уравнению [16]:

$$O_2(\%) = \frac{[O_2]_a}{[O_2]_s} \times 100 \quad (2)$$

где  $[O_2]_a$  – фактическая концентрация кислорода от полного разрушения перекиси водорода, подаваемого в реактор, ммоль/л;  $[O_2]_s$  – стехиометрическая концентрация кислорода на основе ХПК сточных вод, ммоль/л. Избыток кислорода составил по данным расчета ~ 200%.

## Результаты и обсуждение

Олеиновая кислота демонстрирует ограниченную совместимость с водой в стандартных условиях, не образуя гомогенной смеси и не растворяясь в ней, однако проведение ультразвуковой обработки бинарной системы «вода – олеиновая кислота» при комнатной температуре позволяет получить стабильную эмульсию со значительно увеличенной межфазной поверхностью контакта. Дальнейшее увеличение площади контакта фаз наблюдается при переходе к сверхкритическим флюидным условиям,

что объясняется резкой растворяющей способности водной среды, при этом в этих условиях происходит частичное растворение дисперсной фазы (олеиновой кислоты) и последующее уменьшение размеров дисперсных частиц.

В таблице 1 представлены результаты экспериментального исследования кинетики обсуждаемой реакции, при этом выбор для исследования более «мягкого» диапазона температур (673–723К) обусловлен возможностями экспериментальной установки. Однако стоит отметить, что фазового состояния реакционной смеси «вода – олеиновая кислота – пероксид водорода» с мольным соотношением компонентов 0,96:0,008:0,032 отсутствуют литературные данные, а специальное экспериментальное исследование затратно в ресурсах и длительно по времени, при этом исследованный диапазон параметров состояния однозначно определяет сверхкритическое флюидное состояние для чистой воды и, наконец, в необходимых при анализе случаях предполагается использование оптической ячейки высокого давления для визуализации фазового состояния обсуждаемой тройной системы.

**Таблица 1 – ХПК (мгO<sub>2</sub>/л) продукта реакции окисления олеиновой кислоты пероксидом водорода в водной среде в СКФ условиях**

**Table 1 – COD (mgO<sub>2</sub>/L) of the product of the oxidation of oleic acid with hydrogen peroxide in an aqueous medium under SCF conditions**

Параметры	Длительность реакции, мин			
	0	10	20	30
Т, К	0	-	-	-
298*	44615	-	-	-
673	-	23924	20924	12088
698	-	14562	14032	7670
723	-	7846	6927	5196

\* исходный раствор.

На основе полученных экспериментальных данных (табл.1) рассчитаны: константа скорости реакции, энергия активации и эффективность процесса окисления олеиновой кислоты  $X$  (рис. 2). Согласно результатам кинетических исследований, выполненных авторами работы [17], установлено, что реакция окисления характеризуется первым порядком по органическому реагенту. При этом в случае применения пероксида водорода в качестве окислителя в сверхкритической водной среде скорость процесса не демонстрирует зависимости от концентрации кислорода. Данное явление может быть объяснено особенностями механизма реакции в сверхкритических условиях, где пероксид водорода выступает не только источником активных кислородсодержащих радикалов, но и участвует в образовании промежуточных комплексов, лимитирующих стадию окисления. Также о порядке реакции можно судить по виду зависимости  $\ln(C_0/C) - t$ , построенной по данным таблицы 1, которая представляет прямую линию, характерную для реакции первого порядка (рис. 3).

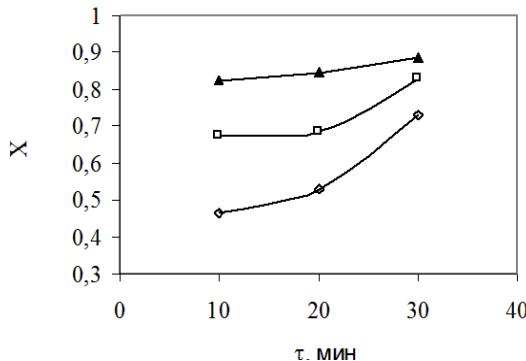
Константа скорости реакции  $k$  и энергия

активации  $E_a$  рассчитаны соответственно по соотношениям (3) и (4):

$$k = 1/\tau \ln(C_0/C), \quad (3)$$

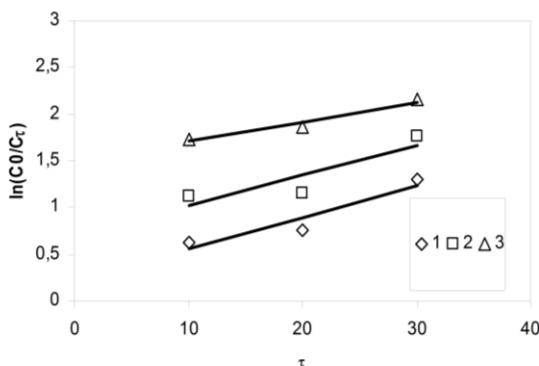
$$k = A * e^{-E_a/RT}, \quad (4)$$

где  $C_0$  и  $C$  – концентрации исходная и текущая, моль/л;  $E_a$  – энергия активации, Дж/моль;  $A$  – предэкспоненциальный множитель, сек<sup>-1</sup>;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль.



**Рис. 2 – Степень окисления олеиновой кислоты  $X$  для реакции, осуществленной при  $P = 30$  МПа:  $\diamond - 673$  К;  $\square - 698$  К;  $\blacktriangle - 723$  К**

**Fig. 2 – Degree of oxidation of oleic acid  $X$  for the reaction carried out at  $P = 30$  MPa:  $\diamond - 673$  K;  $\square - 698$  K;  $\blacktriangle - 723$  K**



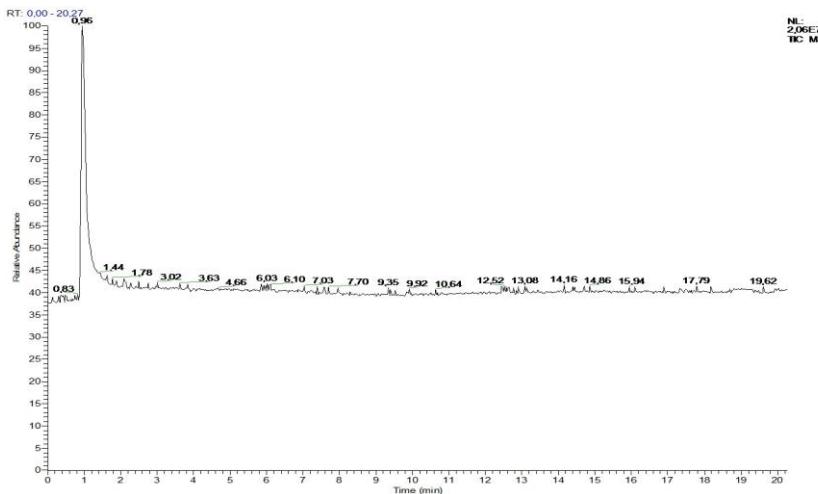
**Рис. 3 – Зависимости  $\ln(C_0/C)$  от длительности проведения реакции ( $\tau$ ) при различных температурах: 1 –  $T = 673$  К; 2 –  $T = 698$  К; 3 –  $T = 723$  К**

**Fig. 3 –  $\ln(C_0/C)$  dependencies on reaction duration ( $\tau$ ) at different temperatures: 1 –  $T = 673$  K; 2 –  $T = 698$  K; 3 –  $T = 723$  K**

Для периодической системы, как и в нашем случае, более 60-80 % органических соединений окислялись в течение первоначального времени нагрева. При дальнейшем нагревании скорость

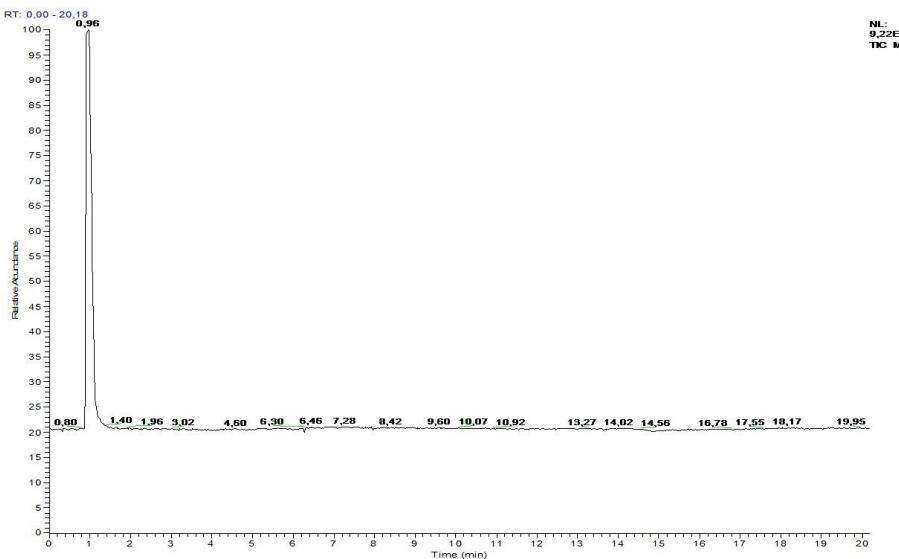
окисления становилась медленнее, а оставшееся органическое вещество требовало более длительного времени для окисления. Реакция СКВО протекает практически до конца (эффективность процесса = 88,6%, оцениваемая относительно значения ХПК для технической воды, получена при максимальных температурой и длительности процесса) с небольшим количеством примесей, о чем свидетельствуют значения ХПК, приведенные в таблице 1. Так допустимое значение для технической воды, получаемой после очистки сточных вод, составляет 1000 мг О<sub>2</sub>/л.

Проведенный хроматографический анализ промежуточных (рис. 4) и конечных (рис. 5) продуктов, полученных в результате сверхкритического водного окисления олеиновой кислоты, достоверно подтвердил полное отсутствие исходного соединения в реакционной смеси. Этот вывод основан на анализе хроматографических профилей, где в обоих случаях наблюдался единственный доминирующий пик со временем удерживания 0,96, соответствующий этанолу, использованному в качестве растворителя при подготовке проб к анализу. Для более глубокой характеристики продуктов реакции были дополнительно получены ИК-Фурье спектры шести образцов, отобранных через 5-минутные интервалы в течение 30-минутного процесса окисления. В спектрах всех образцов четко идентифицированы характерные полосы поглощения: интенсивная полоса карбонильной группы (C=O) при 1712 см<sup>-1</sup> и широкий комплекс полос в области 2600-3200 см<sup>-1</sup>, характерный для колебаний карбоксильной группы. Наличие углеводородного фрагмента подтверждается полосами поглощения при 2900 см<sup>-1</sup>, соответствующими валентным колебаниям Csp<sup>3</sup>-H, хотя эта область частично перекрывается полосой гидроксильной группы. Особого внимания заслуживает значительное уширение полосы поглощения гидроксильной группы, что является надежным индикатором образования димерных структур карбоновых кислот через сильные межмолекулярные водородные связи. Дополнительным подтверждением алкильной природы продуктов служат деформационные колебания групп CH<sub>3</sub> и CH<sub>2</sub> при 1460 и 1380 см<sup>-1</sup>. Полное совпадение полученных спектров с литературными данными для уксусной кислоты [18] в сочетании с показателями преломления (1,3726-1,3740 против 1,3718 для стандартной уксусной кислоты [19]) свидетельствует о том, что основным продуктом окисления олеиновой кислоты в сверхкритических водных условиях является водный раствор уксусной кислоты.



**Рис. 4 – Хроматограмма промежуточного образца продукта реакции СКВО олеиновой кислоты: Р = 29,4 МПа; Т = 723 К; τ = 30 мин**

**Fig. 4 – Chromatogram of an intermediate sample of the oleic acid supercritical water oxidation (SCWO) reaction product: P = 29.4 MPa; T = 723 K; τ = 30 min**



**Рис. 5 – Хроматограмма образца продукта реакции СКВО олеиновой кислоты: Р = 29,4 МПа; Т = 723 К; τ = 30 минут**

**Fig. 5 – Chromatogram of the oleic acid SCWO reaction product sample: P = 29.4 MPa; T = 723 K; τ = 30 minutes**

Согласно рисунку 1, максимальная конверсия в исследованном температурном диапазоне для выбранного состава реакционной смеси приходится на Т = 723 К и длительность реакции в 30 минут. Этим условиям осуществления реакции отвечают значения энергии активации и предэкспоненциального множителя равные, соответственно  $E_a = -94,82$ , кДж/моль и  $A = 25908$  сек<sup>-1</sup>.

Совершенная теоретическая модель в идеале позволила бы предсказывать поведение системы без необходимости проведения экспериментальных исследований, за исключением минимального количества опытов, требуемых для верификации самой теории. Однако в реальности такие ситуации встречаются исключительно редко. Противоположный подход, основанный

исключительно на экспериментальных данных без теоретического обоснования, хотя и может быть применим для ограниченного числа частных случаев, становится практически нереализуемым и экономически нецелесообразным при необходимости изучения многофакторных систем. Таким образом, наиболее продуктивной методологией оказывается синтез теоретического и экспериментального подходов, когда ограниченные, но репрезентативные экспериментальные данные complement недостаточно развитую теоретическую базу, что в конечном итоге позволяет экстраполировать закономерности на неизученные области.

Особую важность такие обобщения приобретают в области кинетики химических реакций.

Проведенный анализ литературных данных по окислению органических соединений в сверхкритической водной среде выявил существенные расхождения в значениях энергии активации ( $E_a$ ) даже для одних и тех же соединений. Хотя указанные расхождения создают дополнительные проблемы для построения универсальных кинетических моделей, они не отменяют принципиальной возможности и необходимости такого обобщения, поскольку позволяют выявить ключевые факторы, влияющие на воспроизводимость кинетических параметров.

### Заключение

Проведенное комплексное исследование процесса сверхкритического водного окисления олеиновой кислоты пероксидом водорода позволило получить значимые научные и практические результаты, вносящие существенный вклад в развитие технологии СКВО. Экспериментально установлено, что данный метод обеспечивает высокую степень деструкции органического субстрата с эффективностью процесса до 88,6% в оптимальных условиях ( $T = 723\text{ K}$ ,  $t = 30\text{ мин}$ ,  $P = 29,4\text{ МПа}$ ).

Кинетический анализ процесса выявил, что реакция окисления характеризуется первым порядком по органическому реагенту, скорость процесса не зависит от концентрации кислорода при использовании пероксида водорода в качестве окислителя, а рассчитанные кинетические параметры ( $E_a = -94,82\text{ кДж/моль}$ ,  $A = 25908\text{ с}^{-1}$ ) представляют ценность для моделирования и масштабирования технологии. Разработанная методика ультразвукового диспергирования позволила преодолеть проблему ограниченной взаимной растворимости реагентов и получить стабильную эмульсию с увеличенной межфазной поверхностью контакта.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для разработки эффективных технологий переработки жирсодержащих отходов химических производств, при этом высокая степень очистки (снижение ХПК с  $44615\text{ мгO}_2/\text{л}$  до  $5196\text{ мгO}_2/\text{л}$ ) и получение ценного продукта в виде уксусной кислоты демонстрируют перспективность метода СКВО для создания малоотходовых производств. Перспективы дальнейших исследований видятся в изучении процесса в более широком диапазоне параметров, разработке математической модели процесса с учетом термодинамических и кинетических закономерностей, а также в проведении технико-экономической оценки целесообразности промышленного внедрения технологии, при этом стоит отметить, что особого внимания заслуживает исследование фазового состояния многокомпонентной системы в околокритической области, что позволит оптимизировать энергетические затраты процесса.

Проведенные исследования демонстрируют эффективность метода сверхкритического водного

окисления для глубокой переработки трудноокисляемых органических соединений и вносит существенный вклад в развитие фундаментальных основ данной технологии, обеспечивая научную базу для ее практической реализации в области охраны окружающей среды и рационального использования ресурсов.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00 (Сверхкритические флюидные технологии в переработке полимеров (FZSG-2023-0007)).

### Литература

1. А.Ф. Корнатовский. XI Конгресс молодых учёных, 351–357 (2022).
2. С.И. Иванков и др. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. **9**, 3–116 (2022).
3. Z. Chen et al. *J. Environ. Chem. Eng.* **9**, 4, 105296 (2021).
4. X.Y. Tang et al. *Chem. Eng. Commun.* **208**, 10, 1494–1510 (2021).
5. H. Fallah Haghighi et al. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **22**, 7, 6049–6070 (2025).
6. Y. Li et al. *Process Saf. Environ. Prot.* **149**, 385–398 (2021).
7. Е.И. Иманбаев и др. Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки, **2**, 521–546 (2025).
8. Р.Р. Хамдеев. Наука и современное общество: актуальные вопросы, **17** (2025).
9. А.У. Аетов. Вестник технологического университета, **28**, 1, 107–112 (2025).
10. G. Fanaee, M. Barati, H. Bashiri. *Renew. Energy*, **124231** (2025).
11. A. Alsaedi et al. *J. Chem.* **1**, 7349052 (2022).
12. А.У. Аетов, Р.А. Усманов, Р.Р. Габитов и др. Журнал органической химии **60**, 4, 486–494 (2024).
13. С.В. Мазанов, А.У. Аетов, Р.А. Усманов и др. Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика **13**, 3, 103–108 (2018).
14. Raeisi et al. *ACS Omega* **10**, 9, 9018–9027 (2025).
15. А.У. Аетов, Ю.Д. Мельник, Н.С. Гаврилов. Вестник технологического университета, **26**, 4, 24–28 (2023).
16. А.У. Аетов, Ю.Д. Мельник, Н.С. Гаврилов. Вестник технологического университета, **26**, 4, 33–37 (2023).
17. М.М. Козлова. Кинетика окислительной деструкции ионообменных смол водным раствором пероксида водорода: диссертация на соискание ученый степени кандидата химических наук: 1.4.4 (2024).
18. Ю.Н. Трубникова и др. Вестник Томского государственного университета. Химия, **28**, 76–87 (2022).
19. В.М. Муратова. Идентификация и ИК-спектрометрическое определение химических маркеров эксплуатационного старения минерального изоляционного масла: диссертация на соискание ученый степени кандидата химических наук: спец. 1.4.2 (2025).

### References

1. A.F. Kornatovskiy. XI Congress of Young Scientists, 351-357 (2022).
2. S.I. Ivankov et al. Environmental Problems and Natural Resources, **9**, 3-116 (2022).
3. Z. Chen et al. *J. Environ. Chem. Eng.* **9**, 4, 105296 (2021).
4. X.Y. Tang et al. *Chem. Eng. Commun.* **208**, 10, 1494–1510 (2021).

- 5.H. Fallah Haghghi et al. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **22**, 7, 6049–6070 (2025).
- 6.Y. Li et al. *Process Saf. Environ. Prot.* **149**, 385–398 (2021).
- 7.E.I. Imanbaev et al. *Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences Series*, **2**, 521–546 (2025).
- 8.R.R. Khamdeev. *Science and Modern Society: Current Issues*, **17** (2025).
- 9.A.U. Aetov. *Herald of Technological University* **28**, 1, 107–112 (2025).
10. G. Fanaee, M. Barati, H. Bashiri. *Renew. Energy*, 124231 (2025).
11. A.A. Alsaedi et al. *J. Chem.* **1**, 7349052 (2022).
12. A.U. Aetov, R.A. Usmanov, R.R. Gabitov et al. *Russ. J. Org. Chem.* **60**, 4, 486–494 (2024).
13. S.V. Mazanov, A.U. Aetov, R.A. Usmanov et al. *Supercrit. Fluids: Theory Pract.* **13**, 3, 103–108 (2018).
14. A. Raeisi et al. *ACS Omega* **10**, 9, 9018–9027 (2025).
15. A.U. Aetov, Yu.D. Melnik, N.S. Gavrilov. *Herald of Technological University*, **26**, 4, 24–28 (2023).
16. A.U. Aetov, Yu.D. Melnik, N.S. Gavrilov. *Herald of Technological University* **26**, 4, 33–37 (2023).
17. M.M. Kozlova. *Kinetics of oxidative destruction of ion-exchange resins by aqueous hydrogen peroxide solution: Cand. Chem. Sci. dissertation*, specialty 1.4.4 (2024).
18. Yu.N. Trubnikova et al. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*, **28**, 76–87 (2022).
19. V.M. Muratova. *Identification and IR-spectrometric determination of chemical markers of operational aging of mineral insulating oil: Cand. Chem. Sci. dissertation*, specialty 1.4.2 (2025)

© А. У. Аетов – старший преподаватель кафедры Теоретических основ теплотехники (ТОТ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, aetovalmaz@mail.ru; К. В. Саерова – доцент кафедры Архитектуры и дизайна, КНИТУ, senya97@inbox.ru; В. В. Бронская – доцент кафедры Процессов и аппаратов химической технологии, КНИТУ, dweronika@mail.ru; Л. Л. Закирова – студент группы 251-М041 кафедры ТОТ, КНИТУ, ZakirovaLL@corp.knrtu.ru; А. А. Маннанова – студент группы 251-М041 кафедры ТОТ, КНИТУ, Mannanova05@gmail.com.

© А. У. Аетов – Senior Lecturer, Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering (TFHE), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, aetovalmaz@mail.ru; К. В. Саерова – Associate Professor of the Department of Architecture and Design, KNRTU, senya97@inbox.ru; В. В. Бронская – Associate Professor of the Department of Processes and Apparatuses of Chemical Engineering, KNRTU, dweronika@mail.ru; Л. Л. Закирова – Student of group 251-M041 of the TFHE department, KNRTU, ZakirovaLL@corp.knrtu.ru; А. А. Маннанова – Student of group 251-M041 of the TFHE department, KNRTU, Mannanova05@gmail.com.

Дата поступления рукописи в редакцию – 28.08.25.

Дата принятия рукописи в печать – 03.12.25.